

УДК 621.342.

Н.Ф. Линник<sup>1</sup>, Ю.С. Литвинов<sup>1</sup>, Р.В. Хоменко<sup>1</sup>, Е.П. Балановский<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный технический университет «ХПИ», Харьков<sup>2</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ

В данной статье проведен сравнительный анализ достоверности передачи информации при использовании усеченных и полных ансамблей сложных фазо-частотно-модулированных сигналов. В результате проведенных исследований установлено, что, применяя усеченные ансамбли сигналов, повышаем достоверность передачи информации на 25-30%.

**Ключевые слова:** достоверность передачи информации, усеченные ансамбли сигналов, вероятность ошибочного приема, фазо-частотно-модулированные сигналы.

### Введение

**Постановка проблемы и анализ публикаций.** В настоящее время все больше ощущается нехватка радиочастотного ресурса [1 – 3]. На использование определенных полос частот претендуют несколько компаний. Поэтому, пользователям выделяется частотный ресурс с ограниченной полосой пропускания. Ограничение полосы частот влияет на эффективность передачи информации [4]. Согласно [1, 2] необходимо обеспечить максимальное и эффективное использование радиочастотного ресурса Украины. При создании и исследовании систем передачи информации необходимо учитывать определенные качественные и количественные показатели, которые дают возможность оценить эффективность системы. К наиболее важным показателям системы передачи информации относятся: вероятность (достоверность) передачи информации, помехоустойчивость, скорость передачи информации и пропускная способность [4, 5]. В [2, 5, 6] изложены методы цифровой обработки сигналов и изображений, практические советы по экономичному конструированию, системному моделированию и проектированию цифровых и аналоговых систем с целью повышения эффективности систем связи.

В [7, 8] по результатам исследований показано, что для повышения эффективности передачи информации целесообразно использовать сложные параллельные фазо-частотно-модулированные сигналы, которые обладают улучшенными свойствами по сравнению с используемыми. Свойства сигналов определяют достоверность передачи информации в пределах физических ресурсов, выделенных системе связи.

**Цель статьи.** Исследование ансамблей сложных параллельных фазо-частотно модулированных сигналов с целью повышения достоверности передачи информации.

### Основной материал

Степень соответствия принятого сообщения переданному называют достоверностью передачи информации. Достоверность передачи информации характеризуется вероятностью искажения для каждого передаваемого бита данных. Искажения бит происходит как из-за наличия помех на линии, так и по причине искажений формы сигнала ограниченной полосой пропускания. Поэтому для повышения достоверности передаваемых данных нужно повышать степень помехоустойчивости линии связи и переносчиков информации.

Повышение эффективности систем передачи информации возможно путем использования параллельных фазо-частотно-модулированных (ПФЧМ) сигналов вида  $Lf = M\varphi$ , где  $L = 2^\alpha$  ( $\alpha = 1, 2, 3, \dots$ ) количество поднесущих частотных компонент  $f$ , каждая из которых имеет  $M = 2^\beta$  ( $\beta = 1, 2, 3, \dots$ ) вариантов модуляции по фазе  $\varphi$  [7]. В сигнале одновременно присутствуют все поднесущие частоты, и мощность ансамбля сигналов определяется  $m = M^L$  (рис. 1).

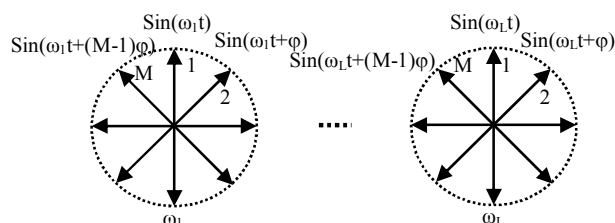


Рис. 1. Фазово-частотная модель ПФЧМ сигнала

Для повышения эффективности систем передачи информации предлагается использовать усеченные ансамбли ПФЧМ сигналов [9].

В [9] рассмотрен алгоритм усечения ансамбля двухчастотных ПФЧМ сигналов с четырехкратной фазовой модуляцией вида  $2f-4\varphi$ . Полный ансамбль содержит  $N=16$  сообщений (комбинаций) с эффек-

тивной шириной спектра  $\Delta\omega_{90\%}$  от 1,553 до 4,133 рад/с. Проведен расчет удельного количества передаваемой информации на единицу эффективной ширины спектра для полного ансамбля ( $\Delta\omega_{90\%} = 4,133$  рад/с) из 16 комбинаций  $I_{уд} = 0,97$  бит с/рад, а для усеченного из 12 комбинаций ( $\Delta\omega_{90\%} = 2,282$  рад/с) –  $I_{уд}^{yc} = 1,57$  бит с/рад.

Проведено исследование помехоустойчивости усеченного ансамбля двухчастотных ПФЧМ сигнала с четырехфазной модуляцией вида 2f-4φ.

В качестве модели канала связи используется простейшая модель канала связи с независимыми ошибками (двоичный симметричный канал без памяти), для которого справедлив биномиальный закон распределения ошибок. Для вычисления вероятности ошибочного приема  $P_{ош}$  принимаем, что в ПФЧМ сигналах используется следующий манипуляционный код (код Грея) (табл. 1). В табл. 1  $\omega_i$  обозначает i-ю поднесущую частоту.

Таблица 1

Использование кода Грея

Сигнал	Код с основанием «4»	Двоичный код
$\sin(\omega_i t)$	0	00
$\cos(\omega_i t)$	1	01
$-\cos(\omega_i t)$	2	10
$-\sin(\omega_i t)$	3	11

Как известно из [3], что величина вероятности ошибочного приема сообщения  $P_{ош}$  для комбинации в n двоичных символов может быть вычислена по формуле:

$$P_{ош} = \sum_{i=1}^n C_n^i P_0^i (1 - P_0)^{n-i}, \quad (1)$$

где  $P_0$  – вероятность ошибочного приема двоичного символа,  $C_n^i$  – число сочетаний из n по i.

Определим  $P_{ош}$  каждой комбинации полного ансамбля ПФЧМ сигналов:

$$P_{ош} = 4P_0(1 - P_0)^3 + 6P_0^2(1 - P_0)^2 + 4P_0^3(1 - P_0) + P_0^4. \quad (2)$$

Для вычисления вероятности ошибочного приема комбинаций усеченного ансамбля ПФЧМ сигналов  $P_{ош}^{yc}$  предлагается эмпирический алгоритм, который изложен ниже.

Комбинации алфавита поделены на группы. В одну группу входят все комбинации определенных значений кода с основанием «4», независимо от места расположения в комбинации. Например, 13 и 31. А также, в эту группу входят все противоположные комбинации: 10 → 23.

Запрещенные комбинации объединены в группы, как показано в табл. 2.

Таблица 2

Группы запрещенных комбинаций

№ п/п	Код с основанием «4»	Кол-во комбинаций
1	00 33	2
2	11 22	2

В усеченном ансамбле за счет совпадений отдельных ошибочных комбинаций с запрещенными комбинациями количество i-кратных ошибок уменьшается. В результате проведенных исследований получено, что в одной отдельной группе комбинаций усеченного ансамбля ПФЧМ сигналов все сообщения имеют одинаковую вероятность ошибочного приема.

Разрешенные комбинации объединены в группы в соответствии с табл. 3, в которой указано количество возможных i-кратных ошибочных комбинаций.

Таблица 3

Группы разрешенных комбинаций

№ п/п	Код с основ. «4»	Кол-во комб.	Количество i-кратных ошибок			
			i=1	i=2	i=3	i=4
1	13 20	4	2	6	2	1
2	10 23	4	2	6	2	1
3	12 21	2	4	2	4	1
4	03 30	2	4	2	4	1

Ошибкой наибольшей кратности является комбинация, противоположная переданной, она всегда присутствует, так как противоположные комбинации относятся к разрешенным комбинациям.

Количество ошибок i-кратности в усеченном ансамбле равняется количеству ошибок (n-i)-кратности. Общее количество всех ошибок i-кратности каждого сообщения в усеченном ансамбле по сравнению с полным ансамблем уменьшается на количество отброшенных комбинаций, так как каждая отброшенная комбинация является ошибочной для данного сообщения определенной кратности.

В результате проведенных исследований получена формула для определения средней вероятности ошибочного приема  $P_{ош}^{yc}$  усеченного ансамбля ПФЧМ сигналов вида 2f-4φ:

$$P_{ош}^{yc} = 2,67P_0(1 - P_0)^3 + 4,67P_0^2(1 - P_0)^2 + 2,67P_0^3(1 - P_0) + P_0^4. \quad (3)$$

Таким образом, из сопоставлений формул (2) и (3) очевидно, что  $P_{ош}^{yc} < P_{ош}$ .

В [9] рассмотрено усечение ансамбля четырехчастотных ПФЧМ сигналов с четырехкратной фазовой модуляцией вида 4f-4φ.

Полный ансамбль содержит N=256 сообщений (комбинаций) с эффективной шириной спектра Δω<sub>90%</sub> от 3,16 до 8,28 рад/с.

Проведен расчет удельного количества передаваемой информации на единицу эффективной ширины спектра для полного ансамбля (Δω<sub>90%</sub>=8,28 рад/с) из 256 комбинаций I<sub>уд</sub>=0,97 бит с/рад, а для усеченного из 196 комбинаций (Δω<sub>90%</sub>=4,0 рад/с) – I<sub>уд</sub><sup>yc</sup>=1,9 бит с/рад.

Проведем анализ помехоустойчивости систем передачи информации при применении усеченных ансамблей ПФЧМ сигналов вида 4f-4φ, используя алгоритм, примененный для анализа ансамблей с двухчастотными ПФЧМ сигналами с четырехкратной фазовой модуляцией.

По формуле (1) определяем вероятность ошибочного приема полного ансамбля

$$P_{\text{ош}} = 8P_0(1-P_0)^7 + 28P_0^2(1-P_0)^6 + 56P_0^3(1-P_0)^5 + 70P_0^4(1-P_0)^4 + 56P_0^5(1-P_0)^3 + 28P_0^6(1-P_0)^2 + 8P_0^7(1-P_0) + P_0^8. \quad (4)$$

Определим вероятность ошибочного приема усеченного ансамбля ПФЧМ сигналов вида 4f-4φ, который имеет 196 комбинаций из 256.

В соответствии с алгоритмом, изложенным выше, запрещенные комбинации объединены в группы (табл. 4).

Таблица 4

Группы запрещенных комбинаций

№ п/п	Код с осн. «4»	Кол-во комб.	№ п/п	Код с осн. «4»	Кол-во комб.
1	0000 3333	2	6	1112 2221	8
2	0001 3332	8	7	1122	6
3	0011 3322	12	8	3330	8
4	0111 3222	8	9	3300	12
5	1111 2222	2			

Разрешенные комбинации объединены в группы в соответствии с табл. 5, в которой указано количество возможных i-кратных ошибочных комбинаций.

В результате проведенных исследований получена формула для определения средней вероятности ошибочного приема P<sub>ош</sub><sup>yc</sup> усеченного ансамбля ПФЧМ сигналов вида 4f-4φ:

$$P_{\text{ош}}^{\text{yc}} = 6,37P_0(1-P_0)^7 + 21,79P_0^2(1-P_0)^6 + 41,63P_0^3(1-P_0)^5 + 53,83P_0^4(1-P_0)^4 + 41,63P_0^5(1-P_0)^3 + 21,79P_0^6(1-P_0)^2 + 6,37P_0^7(1-P_0) + P_0^8. \quad (5)$$

Таким образом, из сопоставлений формул (4) и (5) очевидно, что P<sub>ош</sub><sup>yc</sup> < P<sub>ош</sub>.

Таблица 5

Группы разрешенных комбинаций

№ п/п	Код с осн. «4»	Кол. ком.	Кол-во i-кратных ошибок							
			i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8
1	3302 0031	24	5	24	37	62	5	24	37	1
2	2213 1120	24	5	24	37	62	5	24	37	1
3	0032 3301	24	6	26	36	58	6	26	36	1
4	1132 2201	24	6	26	36	58	6	26	36	1
5	0002 3331	8	6	24	36	62	6	24	36	1
6	2220 1113	8	6	24	36	62	6	24	36	1
7	0012 3321	24	7	17	49	48	7	17	49	1
8	1103 2230	24	7	17	49	48	7	17	49	1
9	0022 3311	12	8	20	48	42	8	20	48	1
10	0123	24	8	18	48	46	8	18	48	1

Исследуем зависимость между  $P_{\text{ош}}^{\text{ус}}$  и  $P_{\text{ош}}$ .  
Для ансамбля ПФЧМ сигналов вида 2f-4ф:

$$\frac{P_{\text{ош}}^{\text{ус}}}{P_{\text{ош}}} \approx 0,75. \quad (6)$$

Полный ансамбль содержит  $N=16$  комб., при усечении  $N_{\text{ус}}=12$  комб.

$$\frac{N_{\text{ус}}}{N} \approx 0,75. \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) имеем:

$$P_{\text{ош}}^{\text{ус}} \approx \frac{N_{\text{ус}}}{N} P_{\text{ош}} = \frac{N_{\text{ус}}}{N} \sum_{i=1}^n C_n^i P_0^i (1-P_0)^{n-i}. \quad (8)$$

Для ансамбля ПФЧМ сигналов вида 4f-4ф:

$$\frac{P_{\text{ош}}^{\text{ус}}}{P_{\text{ош}}} \approx 0,8. \quad (9)$$

$$\frac{N_{\text{ус}}}{N} \approx 0,8. \quad (10)$$

Из выражений (9) и (10) очевидна верность выражения (8) и для ансамбля ПФЧМ сигналов вида 4f-4ф.

Достоверность передачи сообщения прямо пропорциональна вероятности правильного приема  $P_{\text{пр}}$  и обратно пропорциональна вероятности ошибочного приема.

Поэтому при использовании усеченных ансамблей ПФЧМ сигналов из формул (6) и (9) достоверность передачи информации увеличивается.

## Выводы

В результате применения усеченных ансамблей параллельных фазо-частотно модулированных сигналов вида Lf-Mф повышается достоверность передачи информации на 25-30 %.

**Направление дальнейших исследований:** представляет интерес рассмотреть техническую реализацию систем связи, в которых для передачи информации применяются указанные сигналы.

## Список литературы

1. Про радіочастотний ресурс України : Закон України від 11.06.2000. – К. : Відомості Верховної Ради України, № 36.
2. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации / А. Голдсмит. – М. : Техносфера, 2011. – 904 с.
3. Про Концепцію Національної програми інформатизації України : Закон України від 04.02.1998. – К. : Відомості Верховної Ради України, № 27-28.
4. Макаров С.Б. Передача дискретных сообщений по радиоканалам с ограниченной полосой пропускания / С.Б.Макаров, И.А.Цикин. – М.: Радио и связь, 1988. –304 с.
5. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений: издание 3-е испр. И доп. / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2013. – 1101 с.
6. Танг Т.Чан. Высокоскоростная цифровая обработка сигналов и проектирование аналоговых систем / Танг Т.Чан. – М. : Техносфера, 2013. – 192 с.
7. Линник Н.Ф. Сравнительный анализ радиосигналов для определения перспективности их использования системами связи / Н.Ф. Линник, Ю.С. Литвинов // Системи управління, навігації та зв'язку. – К. : ЦНДІНУ, 2012. – Вип. 1(21). – Т. 1. – С. 138-141.
8. Линник Н.Ф. Повышение оперативности передачи информации в военных системах связи / Н.Ф. Линник, Ю.С. Литвинов, Є.П. Балановський // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х. : ХУ ПС, 2014. – Вип. 3(38). – С. 73-76.
9. Линник Н.Ф. Алгоритм построения ансамблей параллельных фазово-частотных модулированных (ПФЧМ) сигналов с улучшенными частотными характеристиками / Н.Ф. Линник, С.Г. Рассомахин, И.В. Злыдень // Збірник наукових праць. Вип. 22. – К. : Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2003. – С. 100-103.

Поступила в редколлегию 19.08.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ

М.Ф. Линник, Ю.С. Литвинов, Р.В. Хоменко, Є.П. Балановський

У даній статті проведений порівняльний аналіз достовірності передачі інформації при використанні відсічених і повних ансамблів складних фазо-частотно-модульованих сигналів. По результатах проведених досліджень встановлено, що при використанні відсічених ансамблів сигналів підвищуємо достовірність передачі інформації на 25-30 %.

**Ключові слова:** достовірність передачі інформації, відсічені ансамблі сигналів, ймовірність помилкового прийому, фазо-частотно-модульовані сигнали.

## IMPROVING RELIABILITY OF INFORMATION TRANSMISSION IN A COMMUNICATION SYSTEM USING COMPLEX SIGNALS

N.F. Linnik, Yu.S. Litvinov, R.V. Khomenko, E.P. Balanovsky

In this paper, a comparative analysis of the reliability of information transmission using truncated and complete ensembles of complex phase-frequency-modulated signals was carried out. It is found that applying truncated constellation increases the reliability of information transmission by 25-30%.

**Keywords:** reliability of information transmission, truncated constellation, the probability of erroneous reception, the phase-frequency modulated signals.